

基于半圆弯拉试验的多聚磷酸改性沥青混合料 低温性能改善研究

李彩霞¹, 张苛², 罗要飞³

(1.陕西交通职业技术学院 公路与铁道工程学院, 陕西 西安 710018; 2.阜阳师范学院 信息工程学院;
3.长安大学 公路学院)

摘要: 基于改善多聚磷酸(PPA)改性沥青混合料低温抗裂性能,室内采用半圆弯拉试验(SCB试验)探讨复合改性沥青或混合料中添加纤维方式的改善效果;并针对纤维改善方案,分析了纤维类型和纤维掺量对PPA改性沥青混合料低温性能的影响及显著性。结果表明:PPA改性沥青混合料中使用复合改性沥青或添加纤维均可改善其低温抗裂性能,相应方案的改善效果优劣依次为PPA/SBR复合改性沥青、PPA/SBS复合改性沥青和PPA/玄武岩纤维,但对于采用Shell-70沥青制备的PPA改性沥青混合料而言,PPA/SBS复合改性沥青和玄武岩纤维两种方案对应的改善效果差异不大;纤维改善PPA改性沥青混合料低温性能的效果与纤维类型和纤维掺量密切相关,其中纤维掺量的影响相对较大;玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维以复合方式添加,基本能够达到与玄武岩纤维相同的改善效果。使用复合纤维达到了改善低温性能和降低成本的双重目的,从而为改善PPA改性沥青混合料的低温性能提供一种新的尝试。

关键词: 道路工程; 低温性能; 多聚磷酸改性沥青混合料; 半圆弯拉试验; 改善程度

1 前言

多聚磷酸改性沥青具有较好的高温抗车辙、抗老化性能和储存稳定性等,近年来在路面中的应用呈现逐年上升的态势,尤其是美国;相比其他类型的改性剂,PPA在沥青中的掺量较低,一般为0.5%~2.0%,且价格低廉,应用于中国南方高温地区可显著降低路面的初期建设成本。但文献[1-5]等研究显示,PPA对沥青低温性能的改善作用不大或者有负面影响,且损害程度与PPA掺量呈正相关关系。一旦南方部分地区遇到像2008年或2018年的冰雪低温灾害天气,采用该结合料铺筑的路面将很可能出现低温开裂破坏,裂缝的出现不仅影响路面感官效果,还会诱发路面水损害,尤其是多雨地区。如何最大程度地提高多聚磷酸改性沥青或多聚磷酸改性沥青混合料的低温抗裂性能,使其能够适用于更多的地区或气候环境,是值得研究的重要课题。针对上述问题,研究者采用其他高

聚物与PPA改性沥青复合或混合料中添加纤维的方式进行改善,取得了较好的效果。刘红瑛、刘建敏、曹晓娟等采用SBS或SBR改性剂与PPA改性沥青复合的方式弥补了单纯PPA改性沥青混合料低温性能受损害的缺陷,且指出PPA与SBR复配对沥青混合料低温性能的改善幅度更好;周艳等研究指出,PPA改性沥青中添加SBS改性剂或TB胶粉与SBS复配改性剂均可以改善其低温性能,且后者的性能相对更好;游金梅对比分析了PPA和SBS改性剂掺量对沥青混合料低温性能的影响,指出1%PPA与3.5%SBS复合得到的改性沥青混合料低温性能相对较好,性能甚至超过了SBS掺量为5.0%的改性沥青混合料;崔磊采用弯曲试验、半圆弯拉试验和J-积分试验对比分析了不同类型多聚磷酸改性沥青混合料的低温性能优劣,发现在所选方案中SBR与PPA复合改性沥青混合料的低温性能相对较好,但性能改善效果受试验方法的影响,且研究中仅采用了一种沥青和单一纤维掺量,说服力相对不足。

收稿日期:2018-10-12

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(编号:17JK0070);安徽高校自然科学基金项目(编号:KJ2018A0668)

作者简介:李彩霞,女,博士,副教授.E-mail:13309268689@163.com

半圆弯拉试验在沥青混合料中的应用主要是评价抗拉强度,相对弯曲试验和间接拉伸试验而言是一种较新的试验方法。该方法有效克服了间接拉伸试验过程中试件中部拉应力分布不均匀以及加载条附近试件塑性变形过大的现象,受力状态更加符合路面实际的受力情况;而相比弯曲试验,其具有试件成型方便、测试结果变异性小等优点,且还可以用于评定现场路面的抗拉强度。结合地区环境气候特征,选取合适的试验温度,运用 SCB 试验开展沥青混合料低温抗裂性能研究,以筛选出性能较好的筑路材料。

鉴于此,该文在先前研究成果的基础上,以 3 种不同的 PPA 改性沥青混合料(基质沥青 SK-70[#]、Shell-70[#] 和东明-70[#])为试验对象,采用 SCB 试验探讨不同方案(复合改性沥青或者混合料中添加纤维)对 PPA 改性沥青混合料低温性能的改善程度,以优化出性价比较好的改善方案;同时借助数理统计方法对比

分析纤维类型和掺量因素对低温性能评价指标的影响程度,其成果可为纤维稳定剂在 PPA 改性沥青混合料中的应用提供参考依据。

2 试验材料与方法

2.1 原材料与混合料配合比参数

基质沥青选取 3 种 A 级沥青,分别为 SK-70[#]、壳牌-70[#] 和东明-70[#],相应的四组分测试结果如表 1 所示,其他技术指标均满足规范要求。PPA 采用 H₃PO₄ 质量分数为 110% 的产品,其中 P₂O₅ 含量不低于 79%,由襄阳某公司提供。粗细集料分别采用辉绿岩和石灰岩,矿粉为石灰岩磨制而成的石粉。混合料矿料级配选用 AC-16C 型密级配,具体级配如图 1 所示。

表 1 基质沥青的四组分含量

沥青类型	饱和分/%	芳香分/%	胶质/%	沥青质/%	组分指数 CI/%
DM-70 [#] (东明-70 [#])	11.5	51.4	25.1	12.0	30.7
Shell-70 [#] (壳牌-70 [#])	4.2	54.0	30.1	11.7	18.9
SK-70 [#]	4.7	54.3	27.5	13.5	22.2

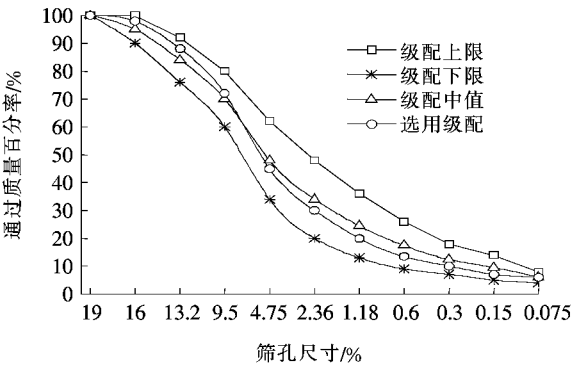


图 1 试验用 AC-16C 型矿料级配

基于改善 PPA 改性沥青混合料低温性能的考虑,

采用复合改性沥青(PPA+SBS、PPA+SBR)或混合料中添加纤维的方式进行对比分析。其中单一 PPA 改性沥青结合料中 PPA 的剂量选定为 1.0%,而 PPA 与 SBS、SBR 复合改性沥青中不同改性剂的掺配比例参照其他研究成果确定,SBS 改性剂为 SBS4303 型产品,SBR 改性剂为颗粒状的 1502 型产品,改性沥青的关键性能指标如表 2 所示。纤维稳定剂采用玄武岩矿物纤维,其长度为 6 mm,掺量为 0.3%。不同 PPA 改性沥青混合料和 PPA 复合改性沥青混合料的掺配方案及油石比情况如表 3 所示,混合料的最佳油石比采用规范推荐的马歇尔试验方法确定。

表 2 不同改性沥青关键性能指标

基质沥青类型	PPA 掺量/%	SBS 掺量/%	SBR 掺量/%	针入度(25℃)/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(5 cm/min)/cm
DM-70 [#]	—	—	—	65.0	47.0	—
	1.00	—	—	50.8	55.2	4.5
	0.75	3.0	—	38.5	68.5	19.3
	0.75	—	2.5	41.2	63.8	30.0

续表 2

基质沥青 类型	PPA 掺量/%	SBS 掺量/%	SBR 掺量/%	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度 (5 cm/min)/cm
Shell-70 [#]	—	—	—	65.9	46.0	—
	1.00	—	—	56.4	50.8	8.0
	0.75	3.0	—	44.6	60.9	21.8
	0.75	—	2.5	50.2	55.7	43.5
SK-70 [#]	—	—	—	63.5	49.0	—
	1.00	—	—	51.9	54.6	7.2
	0.75	3.0	—	40.0	67.8	18.8
	0.75	—	2.5	46.3	60.5	38.6

表 3 不同 PPA 改性沥青混合料和 PPA 复合改性沥青混合料掺配方案及油石比

基质沥青 类型	PPA 掺量/ %	SBS 掺量/ %	SBR 掺量/ %	玄武岩 纤维掺 量/%	最佳 油石比/ %
DM-70 [*]	1.00	—	—	—	4.6
	1.00	—	—	0.3	4.8
	0.75	3.0	—	—	4.8
	0.75	—	2.5	—	4.7
Shell-70 [#]	1.00	—	—	—	4.6
	1.00	—	—	0.3	4.8
	0.75	3.0	—	—	4.8
	0.75	—	2.5	—	4.7
SK-70 [#]	1.00	—	—	—	4.6
	1.00	—	—	0.3	4.8
	0.75	3.0	—	—	4.8
	0.75	—	2.5	—	4.7

2.2 SCB 试验方法与测试条件

SCB 试验采用三点圆棒方式进行加载,两支座之间的距离 S 为 SCB 试件直径 D 的 0.8 倍。评价沥青混合料抗拉性能的指标主要有抗拉强度值和断裂能密度,可根据相应加载过程中的应力—应变曲线求得,计算方法分别如式(1)~(3)所示:

$$\sigma = \frac{4.8P}{Dh} \tag{1}$$

式中: σ 为抗拉强度(MPa); P 为施加最大荷载(N); D 为 SCB 试件直径(mm); h 为 SCB 试件厚度(mm)。

$$\epsilon = \frac{6SD}{1.14D^2(5.578\frac{S}{D}-1.3697)} = \frac{1.36d}{D} \tag{2}$$

式中: ϵ 为试件底部中心处的应变值; d 为试件底部中心处的挠度(mm); S 为支座间的距离(mm)。

$$\frac{d\omega}{dV} = \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon \tag{3}$$

式中: $\frac{d\omega}{dV}$ 为断裂能密度(kPa); ϵ_0 为应力峰值对应的应变值。

试件采用旋转压实法成型,并切割成尺寸为 150 mm(直径)×25 mm(厚度)的半圆柱,试件加载在万能试验机上进行,并以 50 mm/min 的速率施加荷载,直至试件破坏。试验温度根据沥青使用地区的气候特征确定,由沥青路面的气候分区可知中国南方大部分地区属于夏炎热冬温区,其年极端最低气温为-9℃左右,因此采用 SCB 试验评价沥青混合料低温性能时温度选定为-10℃;同时考虑到上述地区冬季气温普遍较高,出现极端最低气温的概率相对较小(尤其是广东省和海南省),试验时还增加了 0℃条件进行对比;试验前试件置于规定温度的环境箱中保温不低于 3 h。

3 低温性能改善措施对比分析

不同温度条件下不同类型 PPA 改性沥青混合料的 SCB 试验结果如表 4 所示,对应试验中平行试件的个数不低于 3 个,且重复性试验中弯拉强度和断裂能密度值的变异系数均不大于 20%。

由表 4 可知:① 单一 PPA 改性沥青混合料中掺加纤维或结合料使用复合改性沥青(PPA 与 SBS 或 SBR 聚合物复合)均能改善其低温抗裂性能,但性能改善效果存在一定的差异,性能优劣总体上为:PPA/SBR 复合改性沥青>PPA/SBS 复合改性沥青>PPA/玄武岩纤维,原因为沥青混合料的低温性能好

表 4 不同温度条件下不同沥青混合料的 SCB 试验结果

混合料类型	0 ℃ 环境		-10 ℃ 环境	
	弯拉	断裂	弯拉	断裂
	强度/ MPa	能密 度/kPa	强度/ MPa	能密 度/kPa
DM-70 [#] + PPA	9.56	0.077 8	7.95	0.059 0
DM-70 [#] + PPA + 纤维	11.45	0.104 2	8.72	0.074 8
DM-70 [#] + PPA + SBS	12.60	0.124 5	9.63	0.091 5
DM-70 [#] + PPA + SBR	12.84	0.138 0	9.68	0.113 0
Shell-70 [#] + PPA	10.40	0.084 2	8.68	0.065 6
Shell-70 [#] + PPA + 纤维	12.52	0.113 5	9.50	0.084 4
Shell-70 [#] + PPA + SBS	12.58	0.120 3	9.55	0.089 8
Shell-70 [#] + PPA + SBR	13.06	0.151 4	10.04	0.122 2
SK-70 [#] + PPA	9.93	0.080 7	8.21	0.061 8
SK-70 [#] + PPA + 纤维	11.82	0.107 8	8.99	0.078 3
SK-70 [#] + PPA + SBS	12.41	0.119 8	9.45	0.088 9
SK-70 [#] + PPA + SBR	12.91	0.142 3	9.77	0.118 6

注:混合料中改性沥青各组分的掺配比例或纤维掺加量见表 3。

主要取决于结合料的特征,结合料对其的贡献率达到了 90%左右,故复合改性沥青改善低温性能的效果优于纤维稳定剂;② 基质沥青的不同,一定程度上会影响所列方案的改善效果,对 PPA 与 SBS 改性剂复合方案而言,3 种沥青中 DM-70[#] 沥青添加复合改性剂后,对应混合料的低温性能最好,说明 SBS 聚合物的改性效果与基质沥青组分含量的差异密切相关,DM-70[#] 沥青的组分指数为 30.7%,恰好位于文献[13]提出的 SBS 改性沥青最佳改善效果对应的组分指数范围(26%~32%),所以其改善效果优于 Shell-70[#] 和 SK-70[#] 沥青。而 Shell-70[#] 和 SK-70[#] 基质沥青添加 PPA/SBR 复合改性剂后,对应的混合料低温性能要优于 DM-70[#] 沥青,这是因为前二者沥青中的芳香分含量相对较高,促进了基质沥青与 SBR 改性剂的相容性,故混合料的低温性能相对较好;③ 采用 Shell-70[#] 沥青制备的 PPA 改性沥青结合料,除 SBS 聚合物改善方案以外,该结合料与不同方案成型的混合料试件,其对应的低温抗裂性能优于 DM-70[#] 和 SK-70[#] 沥青,且方案 SBS 改性剂与添加纤维二者对应的混合料低温性能差异不大,说明采用该 PPA 改性沥青铺筑的路面可以采用添加纤维的方式进行低温性能改善。

采用复合改性沥青的方案改善 PPA 改性沥青混

合料低温性能的效果优于纤维稳定剂,但 SBS 或 SBR 改性沥青中聚合物与沥青之间的反应以物理作用为主,其性能并不稳定,容易受加工条件和存储时间等的影响。为保证改性沥青良好的性能,使用时多采用现场生产法,即在混合料拌和场采用专门生产设备现场制作改性沥青后立即使用;然而该方法一定程度上提高了路面的初期建设成本,且加工工艺流程相对复杂,以至于不能体现出 PPA 改性沥青(组分间以化学反应为主,性能稳定、能够采用工厂化方式生产)的技术优势。由试验发现,对于某些基质沥青制备的 PPA 改性沥青混合料,采用 SBS 改性剂复合或混合料中添加纤维的方式可以达到基本相同的效果,但后者能够在拌和现场进行直接添加、不需要增加额外的设备,方式简便且成本低廉,因此该方法具备一定的推广价值,性价比比较高、有必要对其进行相应的材料优化。

4 纤维改善混合料低温性能影响因素分析

纤维稳定剂凭借其加筋、稳定和桥接等作用,有效改善了混合料的低温抗裂性,但现有研究显示性能改善效果与纤维类型和掺量等因素密切相关,该结论是否适用于 PPA 改性沥青混合料低温性能改善目前尚不得而知。另外不同类型纤维复合在最大限度地发挥各种纤维改善混合料路用性能的同时,还可以显著降低纤维的添加成本,一举多得。基于此,该文将以上试验结果,以 Shell-70[#] 沥青制备的 PPA 改性沥青混合料为试验对象,选取工程中常用的聚酯纤维、玄武岩纤维、木质素纤维和复合纤维添加在混合料中,探讨不同纤维和掺量对混合料低温性能的改善效果及影响程度,从而为纤维在 PPA 改性沥青混合料中的应用提供参考。

(1) 纤维类型与掺量对混合料低温性能的改善效果对比

不同纤维及掺量对 PPA 改性沥青混合料低温性能的改善效果如表 5 所示,各个方案中平行试件的个数不低于 3 个,且指标值的变异系数均不大于 20%。

从表 5 可以看出:① 随着纤维掺量的增加,混合料的低温性能逐渐提高,但掺量超过 0.30%后其改善效果相对不明显,这是因为混合料结构中容纳纤维的量有限,过多的纤维容易产生结团现象、分散不均匀,从而失去改善效果;② 纤维类型的不同显著影响混合料低温性能的改善效果,纤维掺量相同时,掺有不同纤

表 5 -10 ℃ 环境下不同纤维掺量的 PPA 改性沥青混合料 SCB 试验结果

纤维类型	纤维掺量/ %	弯拉强度/ MPa	断裂能 密度/kPa
—	0	8.68	0.065 6
	0.10	8.79	0.069 9
	0.30	9.32	0.080 2
	0.50	9.40	0.081 1
聚酯纤维	0.10	8.93	0.072 5
	0.30	9.50	0.084 4
	0.50	9.58	0.085 0
	0.10	8.75	0.068 5
玄武岩纤维	0.30	9.18	0.076 9
	0.50	9.25	0.077 5
	0.10	8.88	0.071 1
	0.30	9.45	0.083 8
木质素纤维	0.50	9.52	0.084 5
	0.10	8.88	0.071 1
	0.30	9.45	0.083 8
	0.50	9.52	0.084 5

纤维的混合料对应的性能优劣具体为：玄武岩纤维>复

合纤维>聚酯纤维>木质素纤维，复合纤维改善混合料低温性能的效果略低于玄武岩纤维，说明不同纤维复合掺加可以达到明显改善 PPA 改性沥青混合料低温性能的目的；玄武岩纤维改善效果优于其他纤维的原因，玄武岩纤维的分散效果相对较好，拌和后能够均匀地分布于混合料中，最大限度地发挥纤维的“加筋”和“桥接”作用，故对应的混合料低温性能相对最好。

(2) 低温性能影响因素方差分析

纤维类型和掺量对 PPA 改性沥青混合料低温性能不同评价指标的影响程度方差分析结果见表 6。

从表 6 可知：纤维类型和掺量对 PPA 改性沥青混合料低温性能的评价指标(弯拉强度和断裂能密度)均有显著影响，但二者的影响程度存在明显差异。依据检验统计量 F 值大小可知，影响 PPA 改性沥青混合料低温性能指标弯拉强度和断裂能密度的二因素显著程度排序一致，其影响强弱依次为纤维掺量、纤维类型，且纤维掺量对上述指标的影响远远大于纤维类型，可见纤维掺量的变化是决定 PPA 改性沥青混合料低温性能改善效果的重要因素，其合理掺量应根据混合料的性能变化进行确定。

表 6 弯拉强度、断裂能密度影响因素方差分析结果

影响因素	方差来源	离差	自由度	均方离差	F 值	临界值
弯拉强度	校正模型	0.991 ^a	5	0.198	130.269	
	截距	1 018.442	1	1 018.442	669 049.407	
	纤维类型	0.136	3	0.045	29.889	$F_{0.05}(3,6)=4.76$
	纤维掺量	0.855	2	0.427	280.839	$F_{0.05}(2,6)=5.14$
	误差	0.009	6	0.002		
断裂能密度	校正模型	0.000 ^a	5	8.163×10^{-5}	67.296	
	截距	0.073	1	0.073	60 108.071	
	纤维类型	7.418×10^{-5}	3	2.473×10^{-5}	20.383	$F_{0.05}(3,6)=4.76$
	纤维掺量	0.000	2	0.000	137.667	$F_{0.05}(2,6)=5.14$
	误差	7.278×10^{-6}	6	1.213×10^{-6}		

注：a 为 $R^2=0.991$ (调整 $R^2=0.983$)， R^2 为判定系数。

5 结 论

(1) 多聚磷酸改性沥青的使用有损或不影响混合料的低温抗裂性能，通过采用复合改性沥青或混合料中添加纤维的方式均可达到改善 PPA 改性沥青混合料低温性能的目的，但不同方式的改善效果存在差异，

性能优劣为：PPA/SBR 复合改性沥青>PPA/SBS 复合改性沥青>PPA/玄武岩纤维。

(2) 基质沥青的差异影响不同改善措施的效果，对于采用 Shell-70[#] 沥青制备的 PPA 改性沥青混合料，PPA/SBS 复合改性沥青与添加玄武岩纤维二者对应的混合料低温性能差异不大，即二者可以达到基本相同的改善效果，但后者添加方便、成本低廉。

沥青再生剂配制的试验研究

高雪池¹, 曹卫东², 韩冰¹, 于得水², 孙辉¹

(1.齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南 250101; 2.山东大学 土建与水利学院)

摘要:依据旧沥青老化及再生机理,研发了一种沥青再生剂。该再生剂以中黏度芳烃油为基质油,添加 70# 沥青和非胺类沥青抗剥落剂配制而成,采用正交试验方法进行了配方优化设计。通过再生沥青的针入度、软化点、延度及布氏黏度指标确定了再生剂的配方组分为:芳烃油:70# 沥青:非胺类沥青抗剥落剂=15:4:1。再生沥青的性能试验结果表明:研发的再生剂对老化的 70# 沥青和 SBS 改性沥青均有良好的再生效果。

关键词:沥青再生剂;正交试验;配方;再生沥青;性能

1 前言

废旧沥青路面再生利用是保护环境,节约资源,实现公路建设可持续发展的重要技术措施,符合中国当前的新发展理念。中国规范将沥青路面再生技术分为 4 类:厂拌热再生、就地热再生、厂拌冷再生、就地冷再生。其中厂拌热再生技术发展相对较早也较成熟,是

目前为止应用最为普遍的沥青路面再生利用技术。如何有效地提高废旧沥青混合料的利用率已成为厂拌热再生技术研究的热点与重点问题,采用沥青再生剂是实现高掺量再生沥青混合料的一种技术路径。然而,无论是中国国内还是国外常用的沥青再生剂,大多掺加了价格高昂的改性剂来改善老化沥青低温延展性,从而使再生剂的价格居高不下,大大影响了高掺量再生沥青混合料的推广和应用。

(3) 纤维类型和纤维掺量均显著影响 PPA 改性沥青混合料的低温抗裂性能,其中纤维掺量对其的影响相对较大,掺量为 0.30% 时混合料的低温性能相对最好;掺有 4 种不同纤维的混合料低温性能优劣为:玄武岩纤维>复合纤维>聚酯纤维>木质素纤维,且复合纤维的改善效果略低于玄武岩纤维,复合纤维的使用达到了改善低温性能和降低成本的双重目的。

参考文献:

- [1] 曹卫东,刘乐民,刘兆平,等.多聚磷酸改性沥青的试验研究[J].中外公路,2010(3).
- [2] 张恒龙,史才军,余剑英,等.多聚磷酸对不同沥青的改性及改性机理研究[J].建筑材料学报,2013(2).
- [3] 余文科.多聚磷酸改性沥青的研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
- [4] 岳云,霍曼琳,李波,等.基于不同基质沥青的多聚磷酸复配 SBS 改性沥青性能评价[J].硅酸盐通报,2017(2).
- [5] 陈守明,周斌.多聚磷酸改性石油沥青的性能及反应机理

[J].石油沥青,2017(6).

- [6] 刘红瑛,常睿,王春,等.多聚磷酸复合改性沥青混合料的路用性能[J].建筑材料学报,2017(2).
- [7] 刘红瑛,常睿,张铭铭,等.多聚磷酸改性沥青及其混合料低温性能研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2017(5).
- [8] 刘建敏.多聚磷酸复配聚合物改性沥青性能研究[J].公路,2015(1).
- [9] 曹晓娟,张振兴,郝培文,等.多聚磷酸对沥青混合料高低温性能影响研究[J].武汉理工大学学报,2014(6).
- [10] 周艳,黄卫东,傅星恺.多聚磷酸复合改性沥青低温性能[J].建筑材料学报,2017(6).
- [11] 游金梅.多聚磷酸以及多聚磷酸与 SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2014(6).
- [12] 崔磊.多聚磷酸及其复合改性沥青与沥青混合料抗裂性能评价[J].公路工程,2016(6).
- [13] 郝培文,申艳梅. SBS 与沥青相容性的研究[J].西安公路交通大学学报,2001(2).
- [14] 张海伟,郝培文,梁建军,等.复合纤维组成优化及其混合料性能评价[J].北京工业大学学报,2016(2).

收稿日期:2018-11-26

基金项目:齐鲁交通发展集团科技项目(编号:2016B20)

作者简介:高雪池,男,博士,研究员.E-mail:gaoxc@sina.com